

濁度が静止流体中を遊泳するアユの魚群の挙動に及ぼす影響

INFLUENCE OF TURBIDITY ON FISH SCHOOL BEHAVIOR OF *PLECOGLOSSUS ALTIVELIS ALTIVELIS* IN STATISTIC WATER

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・鏝敬介³・桃谷和也³・小原徳晃⁴・定地憲人⁴
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Keisuke KASUGAI, Kazuya MOMOTANI
Noriaki OHARA and Kento JOJI

¹正会員 博(工) 九州工業大学大学院准教授 建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 建設社会工学研究系

³学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻

⁴学生会員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

The water includes turbidity during and after the flood. Almost fish uses eyes and lateral line during swimming, so that the turbidity may effect on the swimming behavior of school of fish. However, there are no study on relations between the turbidity and swimming behavior of school of fish. In this study, the swimming behaviors of school of ayu, *Plecoglossus altivelis altivelis*, by changing turbidity and the number of fish in statistic water, were recorded with a digital video camera. It was found that the fish school is divided to some fish school with an increase of turbidity. This is because ayu can not find the other individual by view due to turbidity. In addition, the distance between each ayu and school of fish radius decrease with an increase of turbidity.

Key Words : turbidity, fish behavior, *Plecoglossus altivelis altivelis*, fish school, static water

1. はじめに

河川構造物を建設する際に、濁水の発生は避けられない。発生した濁水中でも水生生物が死傷しないことが望ましい。そのため、濁度が魚類に及ぼす影響について研究がなされてきた。

まず、濁水中における魚類の摂食行動の解明が試みられた。Gregory & Northcote¹⁾は濁度の増加に伴ってサケの仔魚の摂食行動が抑制されると指摘した。Hazelton & Grossman²⁾はロジサイドダンスを対象として同様の結論を得た。Utne-Palm³⁾は摂食行動が抑制される理由として、濁度の増加による水中視程の低下を挙げている。一方、Andersen *et al.*⁴⁾はカワマスについては、高濁度の方が行動が活発になることを示し、Prchalová *et al.*⁵⁾は静水中と透明度が0.35mの濁水中において、ローチやパーチの活動パターンが同等であることを示した。真山⁶⁾は流速が0.2m/sの開水路流中に投入する粘土の量を変化させてサクラマスの摂餌行動を観察した結果、清水よりも濁水の方が摂餌行動が活発になるが、ある濃度を超えると逆に摂

餌行動が抑制されることを解明した。

つづいて、濁水中の魚類の生存率および濁水に対する忌避行動の解明が試みられた。村岡ら⁷⁾は610×410×315mmの水槽に、成魚アユの姿が目視で確認できないほどの8種の高濃度な濁水を挿入して生存確認を行った。その結果、粒径が1.2~36 μ mの範囲の粒子が鰓に付着するために窒息死することを解明した。Redding *et al.*⁸⁾はサケ科魚類はカオリン等の3種類の懸濁物質の濃度が400~4000mg/lの範囲の場合、3時間以内の暴露であればストレスを感じないと述べた。木下ら⁹⁾は平均粒径が0.009mmのパールクレーの濃度が6000ppm以下ではイワナに48時間暴露させても生存率が100%であることを示した。藤原¹⁰⁾は陶芸用粘土による1480mg/lの濁水にアユを24時間暴露させた結果、全アユが生存することを示した。Newcombe & MacDonald¹¹⁾は濃度だけでなく、その継続時間が魚類の生存を決定することを示した。本田¹²⁾は2本の水路が合流する装置において、1本の水路には清水を、もう1本の水路に濃度を変化させた粘土、ケイソウおよびカオリンをそれぞれ挿入し、合流点

よりも下流に放流したアユの遡上数をカウントした結果、全ての投入物質において15ppm以下では忌避行動が観察されないことを示した。

以上の研究より、魚類は低濃度の濁水に対しては忌避せず、濃度の増加に応じて忌避行動が顕著になると推定される。さらに、濁水中の遊泳挙動の解明も試みられた。井上ら¹³⁾は回転水槽において透明度を28, 17, 13cmに変化させ、ウグイの向流性を観察した。その結果、濁度の増加に伴い正の向流性が増加することを解明した。Berg & Northcote¹⁴⁾は高濃度浮遊砂中ではサケの魚群内の順位性が崩壊することを解明した。鬼束ら¹⁵⁾は濁度を変化させて1尾のアユの挙動を観察した結果、濁度の増加に伴いアユの遊泳速度が低下することを解明した。ただし、魚類は3尾以上で構成される魚群で遊泳する場合と、1尾あるいは2尾で遊泳する場合とではその挙動が異なることが知られている^{16,17)}。そのため、鬼束ら¹⁵⁾の得られた結果は河川において魚群で遊泳している魚に対しては必ずしも適用できない。

本研究では、静止流体中を遊泳するアユの遊泳特性に及ぼす濁度および尾数の影響を解明した。

2. 実験装置および実験条件

清水および墨汁を用いた4濃度の濁水の合計5濃度を採用した。濁度の測定は以下のように行った。清水および

表-1 実験条件

Case name		N (尾)		
E_n (k)	$(E_1 - E_n)/E_1 \times 100$	3	5	7
$E_1=1490$	0	C00-3	C00-5	C00-7
$E_2=1192$	20	C20-3	C20-5	C20-7
$E_3=894$	40	C40-3	C40-5	C40-7
$E_4=596$	60	C60-3	C60-5	C60-7
$E_5=298$	80	C80-3	C80-5	C80-7

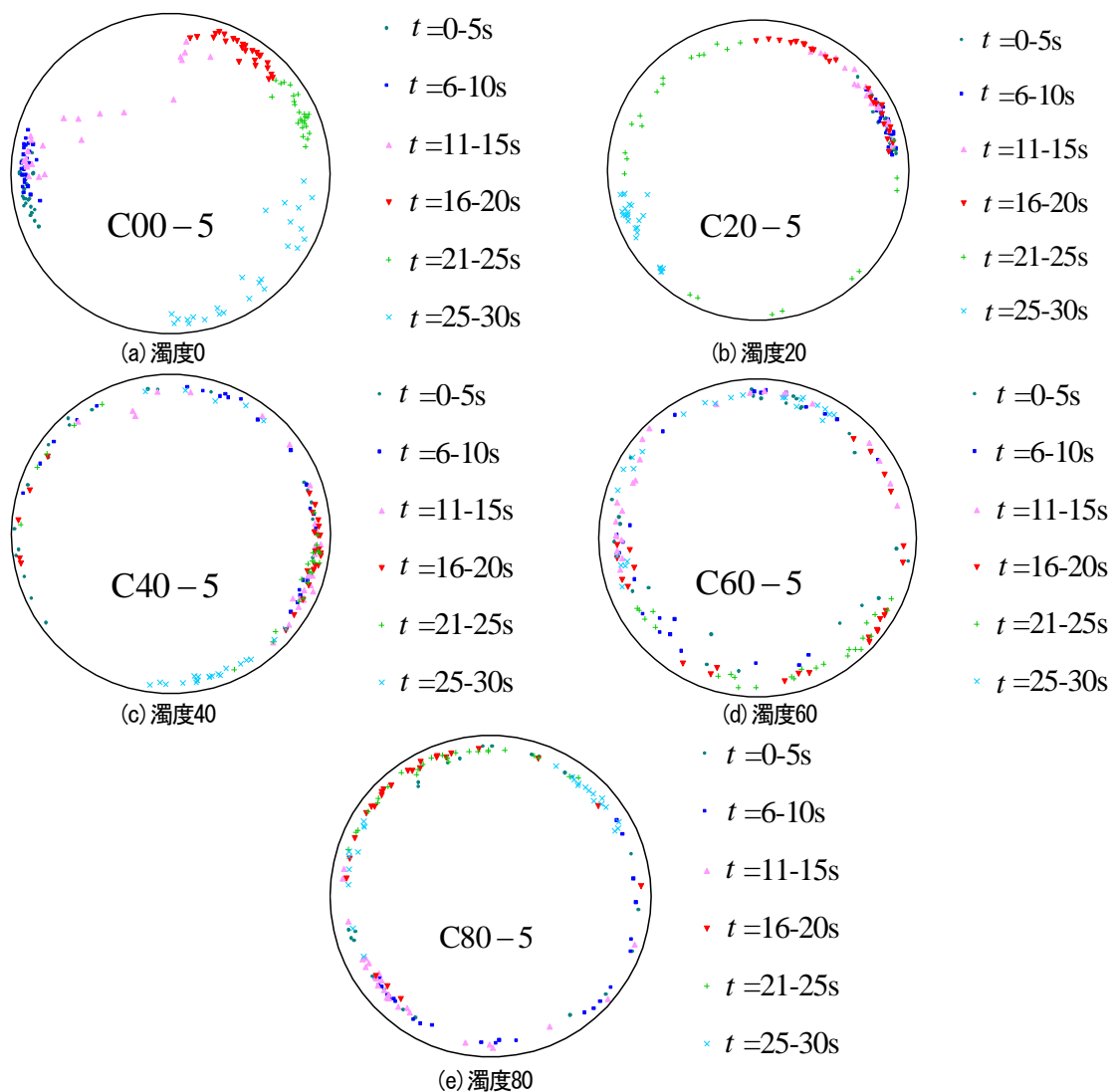


図-1 アユの遊泳軌跡

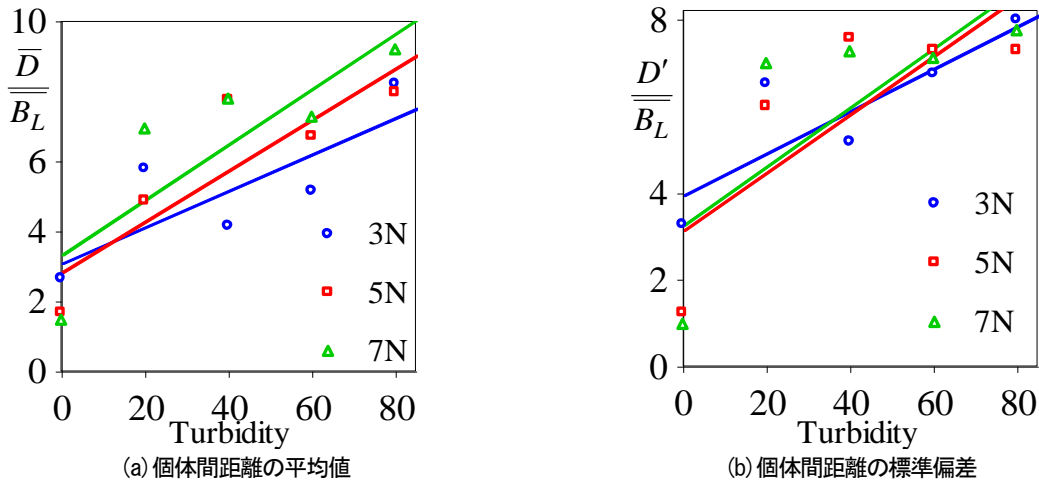


図-2 全個体中におけるアユの個体間距離

4種の濁水を透明な容器に入れ、120Wの光源からの光が容器を0.25m透過した後の照度 E_n を照度計で計測した。清水で計測された照度を E_1 とし、 E_1 と E_n の差と E_1 との比のパーセンテージ表示を濁度とした。

表-1に実験条件を示す。実験には直径1.83m、高さ0.38mの青色の円形プールを用いた。カルキ抜きした水温24℃の水道水を円形プールに入れ、水深を0.04mに設定した。それぞれ円形プールに貯水し、挿入するアユの尾数を3、5および7尾の3通りに変化させた。ケース名は濁度および尾数 N に基づき命名した。実験に用いた養殖アユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)の平均体長 B_L は80mmであった。

円形プールに3~7尾のアユを挿入し5~10s間ほど馴致させた後に、画素数1440×1080、撮影速度30fpsのビデオカメラで1分間撮影する。この撮影を各ケースでそれぞれ30回(合計450回)行った。撮影した動画を1秒間隔で画像に分割した。静止画像および座標プロットソフトを用いてアユの遊泳座標を取得し、魚群内尾数、個体間距離、魚群半径の解析を行った。

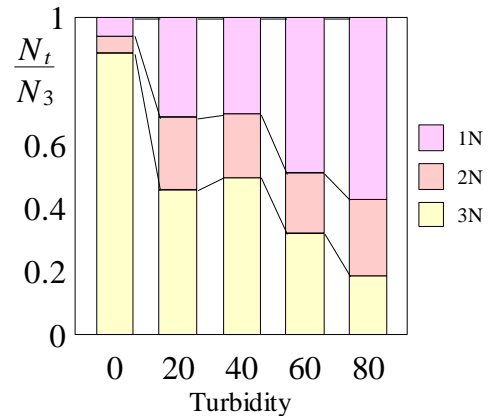
3. 実験結果および考察

(1) アユの遊泳軌跡

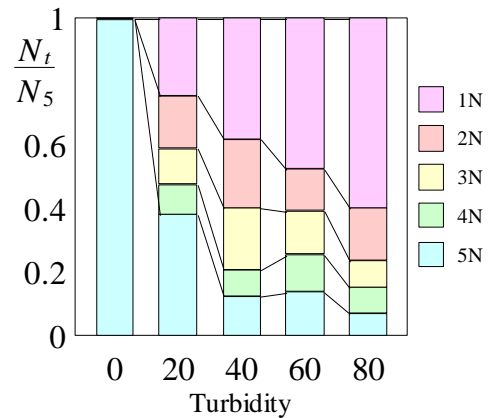
図-1にプールに5尾のアユを挿入したときの各濁度での任意の30秒間における1秒ごとの遊泳位置をそれぞれ1例ずつ示す。図中では5秒ごとに異なる色で示した。濁度が低い場合、同色が密集した領域に分布していることが多く、魚群で行動する個体の割合が多いことを示している。一方、濁度の増加に伴い、同色のプロットのばらつきが大きくなっており、魚群が分離、または単独で行動する割合が多くなっていることがわかる。

(2) 全個体中における個体間距離

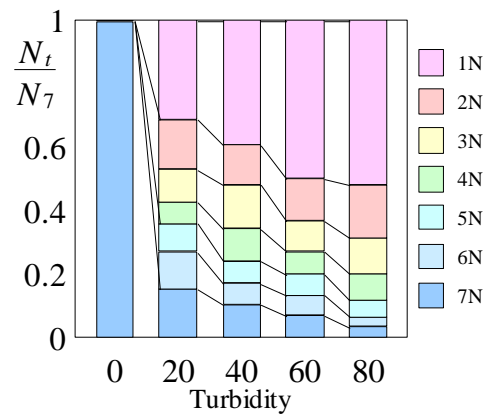
図-2(a), (b)に全個体中の個体間距離の平均値 \overline{D} および標準偏差 D' を平均体長 B_L でそれぞれ除し



(a) 3尾



(b) 5尾



(c) 7尾

図-3 各魚群における魚群内尾数の割合

た値 \bar{D}/\bar{B}_L , D'/\bar{B}_L と濁度との関係と、両者の関係の近似直線をそれぞれ示す. 図-2(a)より全ケースにおいて、濁度の増加に伴って個体間距離が増加していることが理解される. また, 図-2(b)より全ケースにおいて、濁度の増加に伴って個体間距離の標準偏差が増加していることが理解される. このことから、濁度が高いほどアユの個体間距離が増加し、しかもそのばらつきが増加すると判断される. これは、濁度が増加すると隣接する個体を目認することが困難になり、魚群が分離、または単独で遊泳する傾向があることを示唆している.

(3) 各魚群における魚群内尾数の割合

本研究では魚群が複数に分かれる場合や、魚群から離れて単独で遊泳する状況が観察された. 魚群を形成する際の個体間距離は魚種に依存するが、平均的には体長の1倍程度である. 個体間距離が体長の1倍よりもある程度離れる魚の群れは魚群と見なすことはできない. 目視より、アユは個体間距離が体長の3倍以上離れると再度接近することがほとんどないことが確認されたため、本研究では、アユの平均体長の3倍以上離れて形成される魚の群れを別の魚群と定義した.

図-3(a)~(c)に尾数の異なる3ケースにおける、それぞれの魚群での魚群内尾数 N_i を各ケースに挿入した尾数 N_n で除した値 N_i/N_n と濁度との関係を示す. 濁度の増加に伴い、各ケースに挿入した尾数より魚群内尾数が減少している. また、この傾向が濁度0から20に変化したときに顕著であることから、濁度が低い場合であっても、アユは少し離れた個体とは魚群を形成しなくなると考えられる.

(4) 魚群形成継続時間

本実験では、プール内に挿入したアユが必ずしも1つの魚群を形成せずに、複数の魚群を形成する様子が観察された. さらに、複数の魚群も実験中に必ずしも全てが維持されず、さらに分裂する場合があった. そこで、図-4(a)~(c)に各実験中に最大尾数を有する魚群の形成継続時間 \bar{t}_n を総実験時間 T で除した値 \bar{t}_n/T と濁度との関係を示す. 3ケースとも濁度の増加により魚群の継続時間が減少している. これは、遊泳中に魚群から離れた個体が濁度による視界の悪化のため、元の魚群に復帰することが困難になったために生じたと考えられる. また、この傾向は濁度が0から20に変化したときに顕著である. このことから、ほぼ透明なときには魚群を維持する傾向が強いのにに対し、低濃度であっても濁水中では魚群が分裂する傾向が高くなることを表している.

(5) 各魚群における個体間距離

図-5(a)~(c)に各魚群における個体間距離の平均

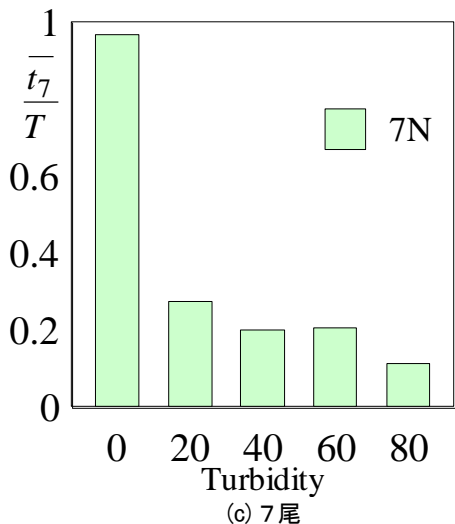
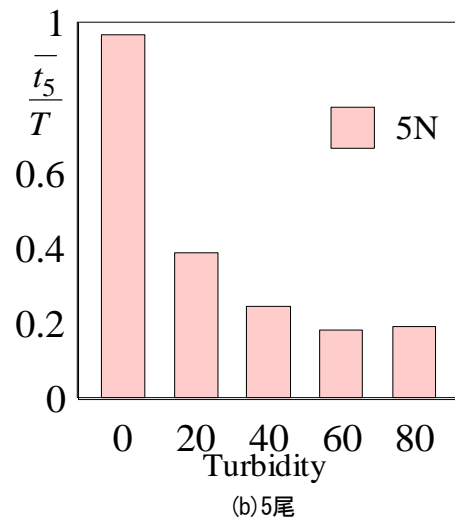
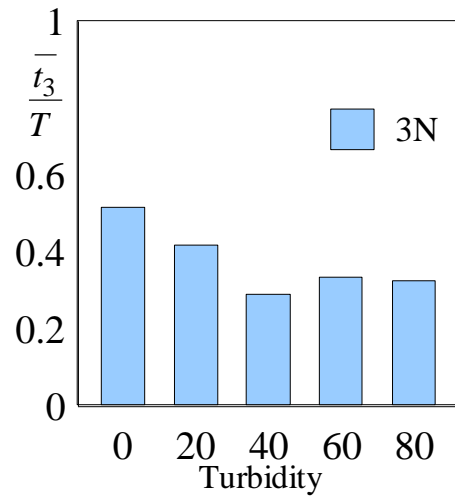
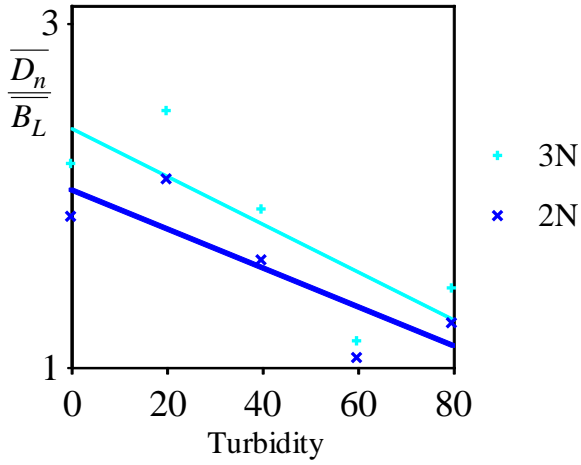
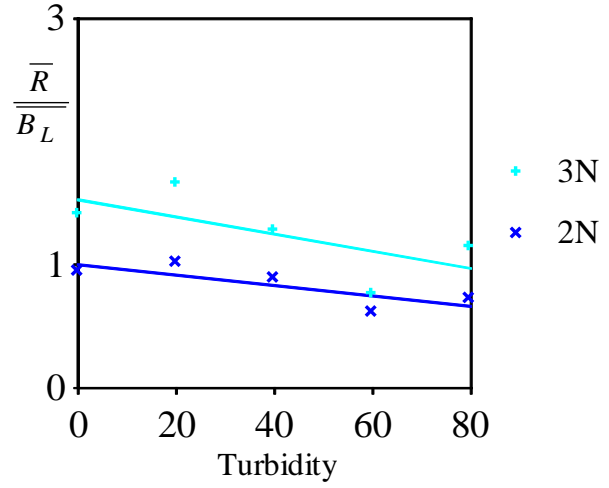


図-4 魚群内尾数が最大のときの魚群形成継続時間

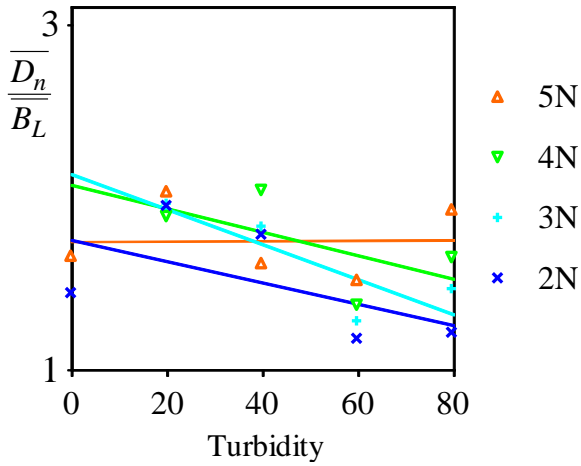
値 \bar{D}_n をアユの平均体長 \bar{B}_L で除した値 \bar{D}_n/\bar{B}_L と濁度との関係、および両者の近似直線で示す. 若干の例外があるものの、おおむね濁度の増加により個体間距離が減少している. これは、濁度の増加に伴い個体を認識できる距離が減少するために生じたと考えられる.



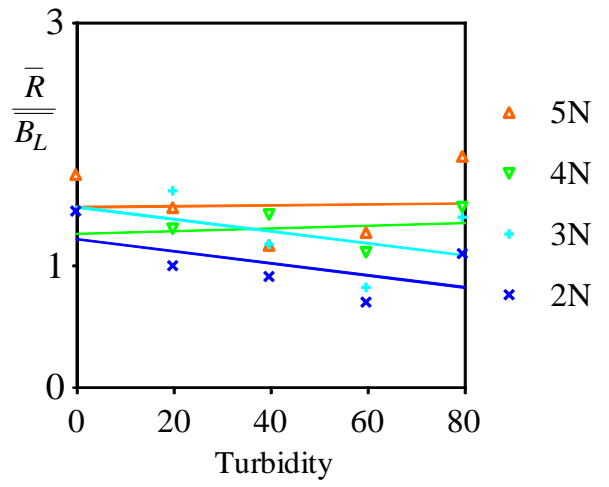
(a)3尾



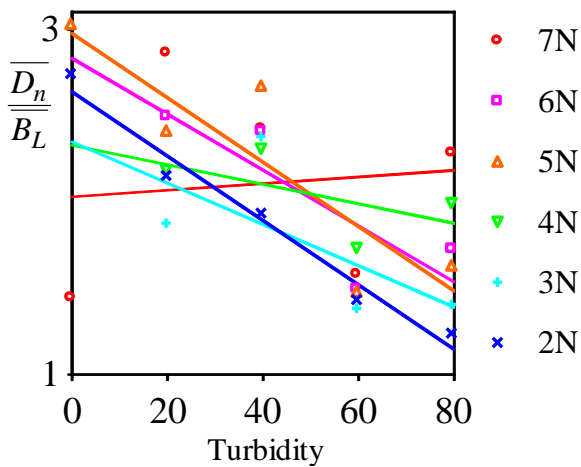
(a)3尾



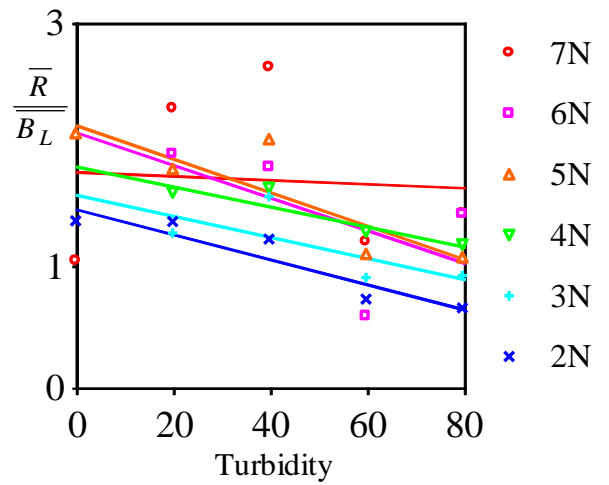
(b)5尾



(b)5尾



(c)7尾



(c)7尾

図-5 各魚群における個体間距離の平均値

図-6 各魚群における魚群半径の平均値

(6) 各魚群における魚群半径

石川¹⁸⁾の定義した式(1)より魚群半径を算出した。

$$R \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^N r_i^2} / N \quad (1)$$

ここに、 R 、 r_i 、 N はそれぞれ魚群半径、魚群重心と各供試魚との距離、各魚群内の総個体数である。

図-6(a)~(c)にそれぞれの魚群における魚群半径の平均値 \bar{R} をアユの平均体長 \bar{B}_L で除した値 \bar{R}/\bar{B}_L と濁度との関係と両者の関係を近似直線で示す。同尾

数の魚群それぞれにおいて、濁度の増加により魚群半径が減少傾向にある。これは、濁度の増加で視界が悪くなり、個体を認識できる距離が短くなったため、図-5で観察されたように個体間距離を減少させ、その結果、魚群半径が小さくなったと考えられる。

4. おわりに

本研究では、静止流体中において濁度および尾数を変化させて、アユの魚群の挙動に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 清水中に比べ、濁水中では魚群が分裂する傾向が高くなる。この傾向は濁度の増加に伴い顕著となる。
- (2) 清水中に比べ、濁水中では魚群内の個体間距離および魚群半径が減少する。この傾向は濁度の増加に伴い顕著となる。これは、濁水中では隣接する個体を認識できる距離が減少するために生じたと考えられる。

謝辞：本研究を実施するに当たり、科学研究費補助金基盤研究(C)26420500（代表：鬼束幸樹）の援助を受けた。

参考文献

- 1) Gregory, R.S. and Northcote, T.G.: Surface, planktonic, and benthic foraging by juvenile chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) in turbid laboratory conditions, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol.50, pp.233-240, 1993.
- 2) Hazelton, P.D. and Grossman, G.D.: The effects of turbidity and an invasive species on foraging success of rosyside dace (*Clinostomus funduloides*), *Freshwater Biology*, Vol.54, pp.1977-1989, 2009.
- 3) Utne-Palm, A.C.: Visual feeding of fish in a turbid environment: Physical and behavioural aspects, *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, Vol.35, pp.111-128, 2002.
- 4) Andersen, M., Jacobsen, L., Grønkjær, P. and Skov, C.: Turbidity increases behavioural diversity in northern pike, *Fisheries Management and Ecology*, Vol.15, pp.377-383, 2008.
- 5) Prchalová, M., Mrkvička, T., Kubečka, J., Peterka, J., Čech, M., Muška, M., Kratochvíl, M. and Vašek, M.: Fish activity as determined by gillnet catch, *Fisheries Research*, Vol.102, pp.291-296, 2010.
- 6) 真山 紘：流水中の濁りがサクラマス (*Oncorhynchus masou*) 幼魚の摂食行動に与える影響，さけ・ます資源管理センター研究報告，第1号，pp.1-11, 1998.
- 7) 村岡敬子，天野邦彦，土居隆秀，久保田仁志，三輪準二：高濃度濁水下におけるアユの生存率と懸濁物質の粒度組成の関係，*魚類学雑誌*，Vol.58, No.2, pp.141-151, 2011.
- 8) Redding, J.M., Schreck, C.B. and Everest, F.H.: Physiological effects on coho salmon and steelhead of exposure to suspended solids, *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol.116, No.5, pp.737-744, 1987.
- 9) 木下篤彦，水山高久，藤田正治，澤田豊明，吉清守：ヒル谷における人為的排砂のイワナへのインパクト，*河川技術に関する論文集*，Vol.7, pp.363-368, 2001.
- 10) 藤原公一：濁水が琵琶湖やその周辺河川に生息する魚類へおよびす影響，*滋賀県水試研報*，第46巻，pp.9-37, 1997.
- 11) Newcombe, C.P. and MacDonald, D.D.: Effects of suspended sediments on aquatic ecosystems, *North American Journal of Fisheries Management*, Vol.11, No.1, pp.72-82, 1991.
- 12) 本田晴朗：アユの遡上行動におよぼす濁質濃度および水温低下の影響，*海洋科学*，Vol.15, No.4, pp.233-255, 1983.
- 13) 井上実，任為公，有元貴文：河川魚類の明・暗環境における向流行動，*日本水産学会誌*，第48巻，12号，pp.1697-1701, 1982.
- 14) Berg, L. and Northcote, T.G.: Changes in territorial, gill-flaring, and feeding behavior in juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) following short-term pulses of suspended sediment, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol.42, pp.1410-1417, 1985.
- 15) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，藏本更織，野口翔平，上田紗奈江：静止流体中を単独で遊泳するアユの遊泳特性に及ぼす濁度の影響，*土木学会論文集G(環境)*，Vol.69, No.6, pp.337-342, 2013.
- 16) Partridge, B.L. and Pitcher, T.J.: The sensory basis of fish schools, *Journal of Comparative Physiology*, Vol.135, pp.315-325, 1980.
- 17) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，三原和也，白岡敏，平野陽一：尾数変化における流速変化がアユの遊泳特性に及ぼす影響の比較，*土木学会論文集B1(水工学)*，Vol.70, No.2, pp.37-48, 2014.
- 18) 石川雅昭：ウグイの魚群行動特性に関する実験的研究，*河川技術論文集*，第6巻，pp.101-106, 2000.

(2016. 9. 30受付)